

Aus dem Institut
für medizinische und physikalische Strahlenkunde
der Universität Erlangen
(Leiter: Prof. Dr. F. Wachsmann)

Untersuchungen über die Möglichkeiten zur Vergrößerung der Dosisleistung von Röntgenapparaturen

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Vorgelegt von
Johannes Kratzsch
aus Gundelsheim / Bay.

Tag der mündlichen Prüfung: 25. 7. 1961



Dekan: Professor Dr. E. Schreck

Referent: Professor Dr. F. Wachsmann

Korreferent: Professor Dr. N. Henning

Strahlenforschung und Strahlenbehandlung · Band III

Sonderbände zur Strahlentherapie · Band 49

VERLAG URBAN & SCHWARZENBERG / MÜNCHEN UND BERLIN

Alle Rechte, auch die des Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten

Aus dem Institut für Strahlenkunde der Universität Erlangen/Nürnberg
(Leiter: Prof. Dr.-Ing. F. Wachsmann)

**Über die Möglichkeit der Erhöhung der Dosisleistung
durch Wahl optimaler Filterstoffe**

Von

Hermann Bösche, Johannes Kratsch und Felix Wachsmann

Mit 10 Abbildungen

1. Aufgabestellung

Die Möglichkeit, heterogene Bremsstrahlungen durch vorgesetzte Filter aufzuhärten, beruht auf der Tatsache, daß *energiereiche Strahlungen* beim Durchgang durch Materie im allgemeinen *weniger geschwächt* werden als energiearme (Abb. 1). Abweichungen von dieser Regel ergeben sich lediglich an den *Absorptionskanten* und bei ultraharten Strahlungen. Die Absorptionskanten der verwendeten Filterstoffe sollen also möglichst außerhalb des Energiebereiches der zu härtenden Strahlungsgemische liegen [1]. Ebenso ist eine Härtung eines Gemisches ultraharter Strahlungen oberhalb der Energie, bei der die Absorption in einem bestimmten Filtermaterial ein Minimum besitzt, unmöglich.

Jede *Aufhärtung* eines Strahlungsgemisches durch Filter ist zwangsläufig mit einer *Schwächung* auch der harten Anteile einer Strahlung verbunden. Da diese Schwächung jedoch unerwünscht ist, erweist sich beim Vergleich mehrerer Filtermaterialien dasjenige Filtermaterial als das vorteilhaftere, dessen *Härtungsgleichwert* in dem betreffenden Energiebereich im Verhältnis zum *Schwächungsgleichwert* günstiger liegt.

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Frage der Auswahl des günstigsten Filtermaterials sind in der Literatur merkwürdigerweise nur sehr selten zu finden. Unseres Wissens haben außer *Liechti* und *Minder* [1] lediglich *Thoraues* [2] sowie *Rump* [3] das Problem des günstigsten Filtermaterials näher untersucht. Alle kommen zum Ergebnis, daß bei höheren Spannungen Stoffe höherer Ordnungszahl bei gleicher Härtung höhere Dosisleistungen zu erzielen gestatten.

In der *radiologischen Praxis* wird mit steigender Strahlenhärte meist Cellon, Aluminium, Kupfer, Zinn (Thoraues-Filter) und evtl. Blei als Filtermaterial benützt. Es ist jedoch unbekannt, in welchen *Spannungsgrenzen* die genannten Stoffe vorteilhaft anzuwenden sind. Ebenso ist noch niemals systematisch untersucht und beschrieben worden, welche *Dosisleistungen* mit den verschiedenen Filtermaterialien zu erzielen sind, d. h. quantitativ, um wieviel bei einem Vergleich mehrerer Filtermaterialien ein Stoff dem anderen überlegen ist. Schließlich sind

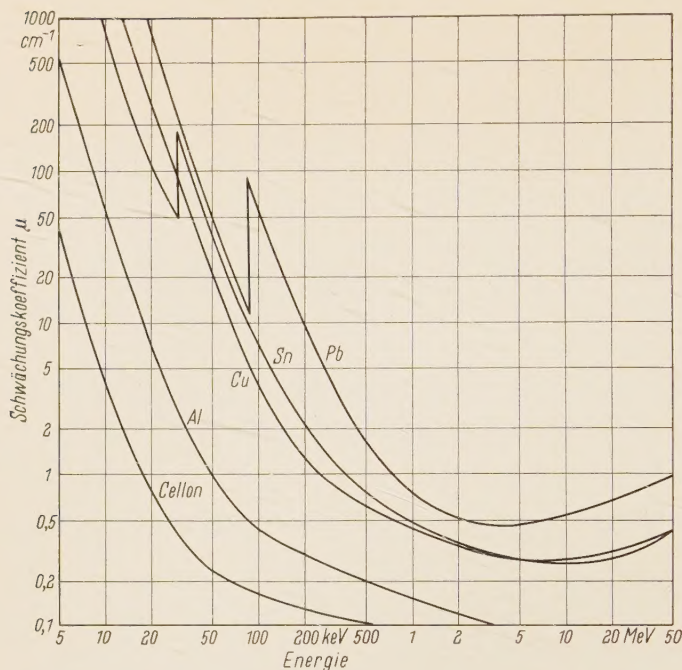


Abb. 1. Schwärzungskoeffizienten verschiedener Filterstoffe in Abhängigkeit von der Energie.

aber wohl auch noch nicht alle als Filtermaterial in Frage kommenden Stoffe unter gleichen Bedingungen hinsichtlich des Verhältnisses ihres Härtings- und Schwächungsgleichwertes untersucht worden. Die „optimalen Filtermaterialien“ im Bereich von Röhrenspannungen von 10 bis 400 kV festzustellen, war also die Aufgabe vorliegender Untersuchungen.

2. Durchführung der Versuche

Die Untersuchungen wurden auf möglichst alle überhaupt in Frage kommenden Filtermaterialien ausgedehnt. Sofern diese in geeigneter Form und Reinheit erhältlich waren, bemühten wir uns ferner, Stoffe zu verwenden, die möglichst einen Überblick über das ganze periodische System geben. Untersucht wurden außer Cellon die in Tabelle 1 angegebenen Elemente.

Die Messungen wurden so ausgeführt, daß bei den in Stufen eingestellten Röhrenspannungen zunächst unter Verwendung von Al- bzw. Cu-Filtern Normalstrahlung (nach Wachsmann [5]) hergestellt wurde. Dann wurden die zur Erzeugung von Normalstrahlung erforderlichen Filter durch Filter aus den zu untersuchenden Stoffen ersetzt, die in der Dicke so bemessen wurden, daß sich eine Strahlung der gleichen Halbwertschicht, d. h. also wieder die zur betreffenden Spannung gehörige Normalstrahlung, ergab. Die auf diese Weise gewonnenen, stets auf gleiche Härting bezogenen Dosisleistungswerte dienen als Vergleich für die Güte der einzelnen Filterstoffe.

Außer Normalstrahlung wurden dann aber auch noch Strahlungen untersucht, die — wie in der Praxis üblich — *willkürlich gefiltert* waren. Die dabei gefundenen Ergebnisse sind in den Abbildungen 6 und 10 wiedergegeben.

Tabelle 1.

Untersuchte Filterstoffe	Ordnungszahl und Symbol	Untersuchte Filterstoffe	Ordnungszahl und Symbol
Cellon	etwa 8,1 (effektive)	Kupfer	29 Cu
Natrium	11 Na	Zink	30 Zn
Aluminium	13 Al	Zirkon	40 Zr
Schwefel	16 S	Molybdän	42 Mo
Kalzium	20 Ca	Silber	47 Ag
Titan	22 Ti	Zinn	50 Sn
Eisen	26 Fe	Tantal	73 Ta
Nickel	28 Ni	Gold	79 Au
		Blei	82 Pb

Die *Meßanordnung* war stets gleich (Abb. 2). Die von der Röntgenröhre kommende Strahlung wurde durch zwei Bleiplatten von 5 mm Dicke, deren obere bei einem Fokusabstand von 25 cm eine Öffnung von 2,5 cm besaß, eng ausgeblendet. 15 cm unter dieser befand sich die zweite Bleiplatte mit einer Blendenöffnung von 3,0 cm Durchmesser. Die Meßkammer wurde in 10 cm Abstand von der unteren Blende, d. h. also in 50 cm Abstand vom Brennfleck, angebracht. Die erforderlichen Filter wurden auf die obere Blendenplatte aufgelegt.

Lediglich bei den Weichstrahlungsmessungen unter 50 kV wurde der Abstand zwischen Brennfleck und Meßkammer zur Kleinhaltung des Einflusses der Luftabsorption auf 30 cm verringert.

Als *Strahlenquellen* dienten uns für die verschiedenen Spannungsbereiche:

- Von 10 bis 50 kV Siemens-Dermopan (Halbwellenapparat!) mit Berylliumfensterröhre, Eigenfilterung 1 mm Be.
- Von 50 bis 150 kV Siemens-Stabilipan mit einseitig geerdeter Berylliumfensterröhre, Eigenfilterung 3 mm Be.
- Von 60 bis 200 kV Siemens-Stabilivolt mit 200-kV-Therapieröhre in Porzellanhaube, Gleichwert der Eigenfilterung etwa 1,1 mm Al oder 0,03 mm Cu.
- Von 120 bis 300 kV Siemens-Stabilipan mit 300-kV-Therapieröhre in Ölhaube, Gleichwert der Eigenfilterung etwa 2,5 mm Al oder 0,085 mm Cu.
- Von 200 bis 400 kV Versuchsapparatur mit Versuchsröhre in Ölwanne, Eigenfilterung 4 mm Be, 2,5 mm Al, 260 mm Isolieröl und 10 mm Pertinax.

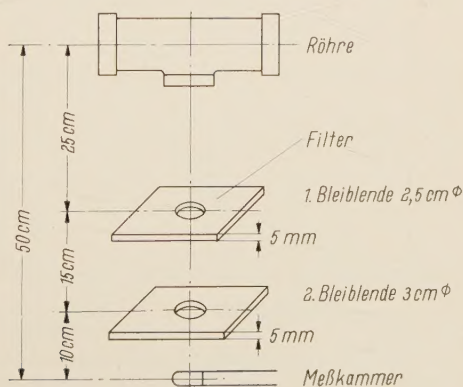


Abb. 2. Benützte Versuchsanordnung.

Die Messungen wurden so ausgeführt, daß sich die Spannungsbereiche der mit den verschiedenen Apparaturen durchgeführten Meßreihen überlappten.

Die Dosisleistungen und Halbwertschichten wurden mit verschiedenen *Dosimetern* und *Meßkammern* gemessen, die den jeweils verwendeten Spannungsbereichen angepaßt waren. Dort, wo für ein und dieselbe Meßreihe mehrere Dosimeter oder Meßkammern Anwendung fanden, wurden aus den Meßwerten Mittelwerte gebildet. Im einzelnen standen zur Verfügung:

Siemens-Universaldosimeter mit Weichstrahl- und Fingerhutkammer;

Simplex-Dosimeter der Physikalisch-Technischen Werkstätten mit Weichstrahl- und Normalkammer;

Victoreen-Condenser R-Meter Modell 570 mit den verschiedenen Kondensatorkammern;

Brindi-Dosimeter mit 40 cm³ Normalkammer.

3. Ergebnisse der Messungen mit einheitlichen Filterstoffen

Schon die *ersten Messungen* (Kratsch [4]) ergaben, daß die bei *gleicher Härtung* mit den verschiedenen Filterstoffen erzielbaren Dosisleistungen sehr verschieden groß sind (Abb. 3). So zeigt sich z. B., daß Cellon unterhalb von etwa 25 kV den anderen gebräuchlichen Filtermaterialien deutlich überlegen ist. Zwischen 25 und 70 kV liegt dagegen Aluminium am günstigsten, um von hier bis 200 kV von Kupfer abgelöst zu werden. Oberhalb 200 kV ist dann in Übereinstimmung mit Thoraues [2] Zinn dasjenige Material, mit dem bisher die höchsten Dosisleistungen erzielt wurden. Von Interesse ist aber, wie ungünstig die genannten Stoffe in anderen Energiebereichen werden. So kann z. B. mit Kupfer als Filtermaterial bei 40 kV eine Dosisleistung erreicht werden, die nur etwa $\frac{1}{10}$ der mit Aluminium erzielten Dosisleistung beträgt, und mit Zinn bei 70 kV sogar Dosisleistungen, die kleiner als $\frac{1}{30}$ derjenigen von Aluminium oder Kupfer sind. (Mit Zinn läßt sich im Gebiet von 70 kV der hier liegenden Absorptionskante wegen schlechthin keine Strahlenhärtung erzeugen!)

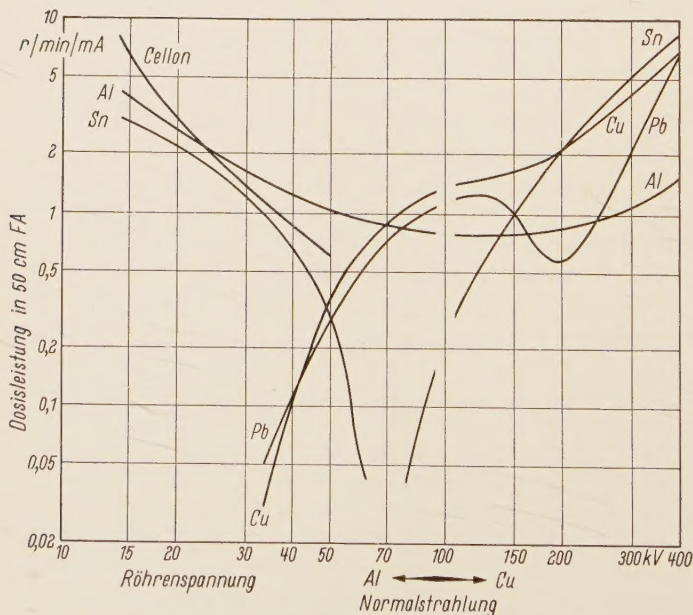


Abb. 3. Mit den gebräuchlichen Filtermaterialien bei verschiedenen Röhrenspannungen erzielbare Dosisleistungen, gemessen bei Normalstrahlung.

Nachdem die in allen Spannungsbereichen als *ungünstig* erkannten Stoffe (^{11}Na , ^{16}S , ^{20}Ca , ^{42}Mo und ^{79}Au) ausgeschieden waren, wurden weitere Messungen — insbesondere auch unter Verwendung bisher als Filtermaterial nicht oder nur selten benützter Stoffe — durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen im einzelnen hier wiederzugeben, würde zu weit führen. Es sollen deshalb für die verschiedenen Gebiete der Strahlenanwendung, und zwar für die Weichstrahltherapie, die Röntgendiagnostik und die Tiefentherapie nur die *günstigsten Filtermaterialien* aufgezeigt und die mit ihnen erzielten Ergebnisse den mit den bisher gebräuchlichen Filterstoffen erreichbaren Werten gegenübergestellt werden.

a) Weichstrahltherapie (10 bis 50 kV)

Für den Spannungsbereich unterhalb 20 kV erweist sich *Cellon* von allen Stoffen in bezug auf die erzielbare Dosisleistung als das günstigste Material (Abb. 4). Bei 15 kV (Normalstrahlung!) lassen sich mit ihm etwa einhalbmal so große Dosisleistungen erzielen als mit Aluminium. Oberhalb 25 kV ist dann *Aluminium* überlegen. Alle anderen Stoffe erreichen *Cellon* und *Aluminium* nicht. Lediglich Titan liefert zwischen 20 und 30 kV günstige Werte, wobei die mit Titan erzeugte Strahlung — wie durch Messung der zweiten Halbwertschicht festgestellt wurde — aber nicht so homogen ist wie die mit *Cellon* oder *Aluminium* gefilterte.

Praktisch besteht in der *Weichstrahltherapie* infolge des hier üblichen kleinen Fokus-Haut-Abstandes (meist 30 cm oder weniger) und wegen des möglichen großen Röhrenstromes (z. B. 25 mA) kein Bedürfnis, die Dosisleistung noch weiter zu erhöhen. Außerdem sind in diesem Gebiet stark gefilterte homogene Strahlungen uninteressant. Es kann also empfohlen werden, im Weichstrahlgebiet über etwa 20 kV wie auch bisher *Aluminium* als Filtermaterial zu verwenden. Unterhalb 20 kV ist dagegen *Cellon* vorzuziehen, falls es auf die Erzielung hoher Dosisleistungen ankommt. *Cellon* ist im übrigen auch deshalb vorteilhaft, weil es in dickeren Schichten verwendet werden kann, die mechanisch widerstandsfähiger als dünne *Aluminium*folien sind.

b) Röntgendiagnostik (50 bis 150 kV)

Im Gebiet zwischen 50 und 150 kV konkurrieren *Aluminium*, *Kupfer* und *Eisen* bezüglich der besten Dosisleistung miteinander (Abb. 5). *Aluminium* gibt dabei bis etwa 70 kV bessere Dosisleistungen als *Kupfer*. Beide werden jedoch zwischen

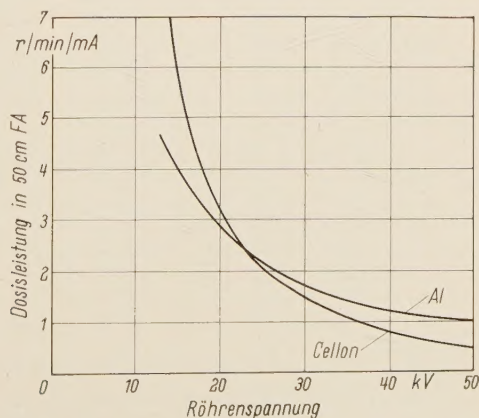


Abb. 4. Dosisleistungen im Weichstrahlgebiet bei Normalstrahlung.

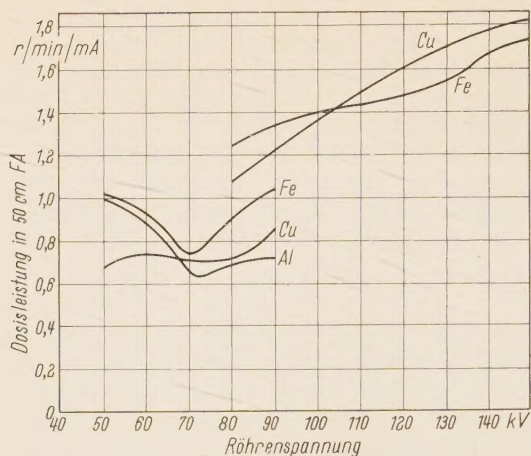


Abb. 5. Dosisleistungen im Diagnostikbereich. (Die linke Hälfte der Abbildung bezieht sich auf Al-Normalstrahlung, die rechte auf Cu-Normalstrahlung.)

50 und 105 kV von Eisen übertroffen. Der Gewinn gegenüber dem bisher in der Diagnostik meist benützten Aluminium beträgt dabei bis zu 35%. Oberhalb 105 kV ist dann aber Kupfer das günstigste Filtermaterial.

In Anbetracht der Tatsache, daß ein Filter aus Eisen nicht mehr kostet als ein solches aus Aluminium, sollte man unseres Erachtens von der Möglichkeit, die Eisenfilter bieten, unbedingt Gebrauch machen. Die Frage ist nur, ob Eisen als Filtermaterial für den ganzen Diagnostikbereich von 50 bis 150 kV in Frage kommt oder ob oberhalb 105 kV zweckmäßigerweise auf Kupfer übergegangen werden soll. Dies würde jedenfalls eine unerwünschte Komplikation bedeuten. Bei der Entscheidung dieser Frage ist zu beachten, daß die in Abbildung 5 gezeigten Kurven für Gleichspannung und Normalstrahlung, d.h. für eine relativ stark gefilterte Strahlung, gelten. Bei sinusoidalem Spannungsverlauf und bei schwächer gefilterten Strahlungen liegt der Schnittpunkt von Kupfer und Eisen bei höheren Spannungen. Am Drehstromapparat kann bei der in der Diagnostik üblichen Filterung mit einer Lage des Schnittpunktes bei 125 kV und beim Halbwellen- oder Vierventilapparat mit einer Überschneidung bei 150 kV gerechnet werden.

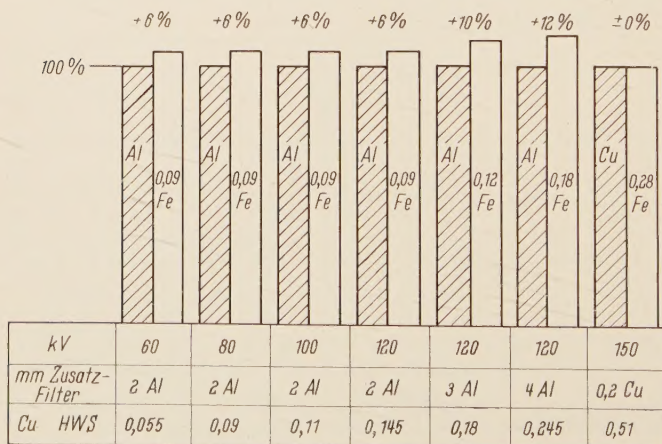


Abb. 6. Vergleich der Dosisleistung von Eisenfiltern mit der von Aluminium- bzw. Kupferfiltern der in der Diagnostik üblichen Stärke.

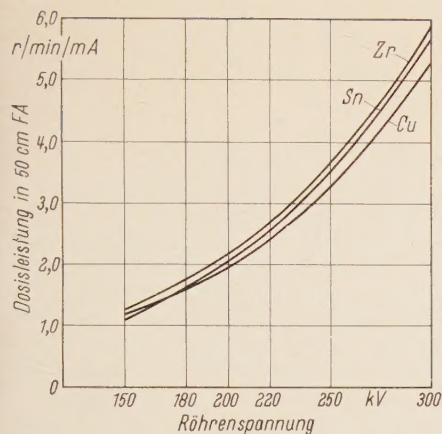


Abb. 7. Dosisleistungen im Gebiet der Tiefentherapie bei Normalbestrahlung.

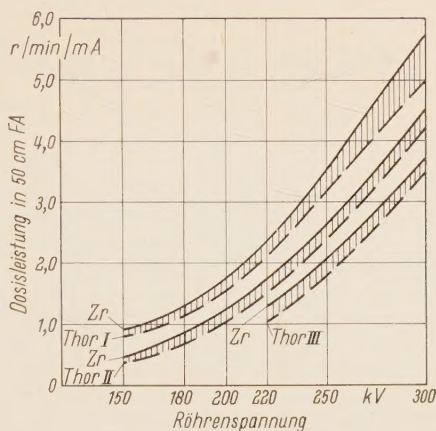


Abb. 8. Vergleich der Dosisleistung von Zirkonfiltern mit der der Thoraeusfilter I bis III.

Um sicher zu gehen, daß Eisen nicht nur bei *Normalstrahlungen* Aluminium bzw. Kupfer überlegen ist, haben wir die mit Eisen erzielbaren Dosisleistungen bei verschiedenen Spannungen und den in der Diagnostik üblichen Filterungen mit den Dosisleistungen von Aluminium- bzw. Kupferfiltern verglichen. Das Ergebnis dieser Messungen, das die Überlegenheit der Eisenfilter bestätigt, ist in Abbildung 6 dargestellt. Bei der Beurteilung des durch die Verwendung von Eisen als Filtermaterial erzielbaren Gewinns an Dosisleistung darf man allerdings nicht vergessen, daß der Gewinn nicht so groß ist wie angegeben, wenn die Eigenfilterung der Röntgenröhre größer ist als bei unseren mit einer Berylliumfensterröhre durchgeführten Versuchen.

Zusammenfassend kann also *Eisen* als Filtermaterial für den *ganzen Diagnostikbereich* von 50 bis 150 kV empfohlen werden.

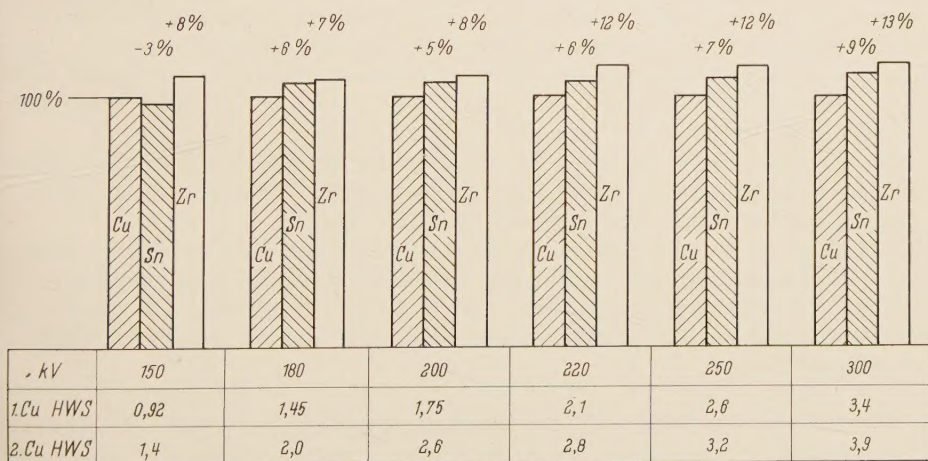


Abb. 9. Gewinn an Dosisleistung bei Verwendung von Zirkonfiltern gegenüber Kupfer- und Zinnfiltern bei Normalstrahlung und Vergleich der ersten und zweiten Halbwertschicht.

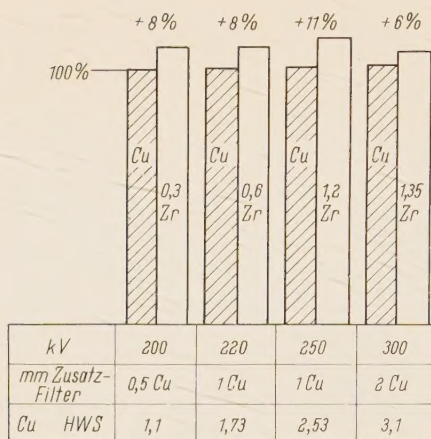


Abb. 10. Gewinn an Dosisleistung bei Zirkonfiltern im Vergleich mit Kupfer verschiedener Dicke gefilterten Therapiestrahlungen.

c) Tiefentherapie (150 bis 300 kV)

Im Gebiet über 150 kV kommt als Filtermaterial von allen untersuchten Stoffen nur Kupfer und Zinn sowie als neues Material *Zirkon* in Betracht. Zinn erweist sich dabei oberhalb 180 kV dem Kupfer überlegen. Nochmals um ein geringes günstiger liegt im ganzen Gebiet aber Zirkon (Abb. 7).

Bei Spannungen über 400 kV, die zu untersuchen uns die Möglichkeit fehlt, dürfte *Zinn* und von etwa 500 kV aufwärts (vgl. Abb. 1) *Blei* allen anderen Stoffen einschließlich Zirkon überlegen sein. Da im ganzen Bereich zwischen 150 bis über 300 kV aber *Zirkon* allen anderen Stoffen überlegen ist, wird dieses auch mechanisch und chemisch günstige und preislich ohne weiteres tragbare Metall für die *Tiefentherapie als einheitliches Filtermaterial empfohlen*.

Bevor wir zu diesem Schluß kamen, hielten wir es allerdings auch hier für erforderlich, Zirkon auch noch bei anderen Filterungen als bei Normalstrahlung mit den ihrer hohen Dosisleistung wegen bekannten 3 *Thoraeusfiltern* zu vergleichen. Dies geschah, indem wir bei Spannungen zwischen 150 und 300 kV die sich bei den verschiedenen Thoraeusfiltern ergebenden Halbwertschichten ermittelten und dann Strahlungen der gleichen Halbwertschichten mit Zirkon herstellten. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 8 zusammengestellt. Aus diesem Bild ist zu ersehen, daß Zirkon im ganzen Spannungsbereich allen drei Thoraeusfiltern hinsichtlich der erzielbaren Dosisleistung überlegen ist.

Die zur Kontrolle gemessene 2. *Halbwertschicht* der Strahlungen ergab dabei eine Übereinstimmung der Werte zwischen Thoraeus- und Zirkonfiltern und ebenso zwischen Kupfer-, Zinn- und Zirkonfiltern (Abb. 9).

Schließlich wurde auch noch im Gebiet der Tiefentherapiestrahungen versucht, ob Zirkon Kupfer auch bei Strahlungen überlegen ist, die nicht entsprechend der Bedingung Normalstrahlung gefiltert sind. Auch hier ergab sich, daß die Dosisleistung von Zirkonfiltern immer um etwa 5 bis 10% höher ist als die von Kupferfiltern (Abb. 10).

4. Verwendung von Filtern, die aus verschiedenen Stoffen zusammengesetzt sind

Der Vollständigkeit wegen sei noch erwähnt, daß wir nicht nur Filter aus *einheitlichen Stoffen*, sondern — in der Hoffnung, noch höhere Dosisleistungen zu erzielen — auch Filter, die aus verschiedenen dicken Schichten der Stoffe Titan, Eisen,

Nickel, Kupfer, Zink, Zirkon, Silber und Zinn *kombiniert* waren, untersucht haben. Dabei konnten jedoch in keinem Falle bessere Ergebnisse erzielt werden als bei der Verwendung einheitlicher Stoffe. Auf eine genauere Wiedergabe dieser Meßergebnisse kann also verzichtet werden.

Zusammenfassung

Es wurde die Aufgabe gestellt, die üblichen Filtermaterialien hinsichtlich des Verhältnisses ihrer Schwächungs- und Härtungsgleichwerte zu untersuchen und festzustellen, in welchem Spannungsbereich mit Filtern aus verschiedenem Material bei gleicher Härtung die höchsten Dosisleistungen zu erzielen sind. Außerdem wurden alle als Filtermaterial in Frage kommenden Stoffe im Spannungsbereich von 10 bis 400 kV systematisch untersucht. Es ergab sich, daß Cellon im Spannungsbereich von 10 bis 25 kV, Aluminium von 25 bis 50 kV, Eisen von 50 bis 150 kV und Zirkon von 150 kV aufwärts bei gleicher Härtung die höchsten Dosisleistungen liefern. Unter Berücksichtigung praktischer Gesichtspunkte wird daher für die Weichstrahltherapie Cellon und Aluminium, für die gesamte Diagnostik Eisen und für die Tiefentherapie Zirkon als Filtermaterial empfohlen. Die dabei gegenüber den bisher üblichen Filtern erzielbaren Dosisleistungsgewinne werden angegeben. Wenn diese auch meist nicht sehr groß sind, bedeuten sie doch eine billige Erhöhung der Leistung unserer Röntgenapparaturen.

Schrifttum

1. *Liechti, A.*, u. *W. Minder*: Röntgenphysik, 2. Aufl. Wien 1955. — 2. *Thoraeus, R.*: Acta radiol. Suppl. 15 (1932). — 3. *Rump, W.*: Radiol. Rdsch. 6 (1937): 137. — 4. *Kratsch, J.*: Diss. Erlangen 1961. — 5. *Wachsmann, F.*: Strahlentherapie 83 (1950): 31.

LEBENS LAUF

Als Sohn des Zeichners Walter Kratzsch und seiner Ehefrau Magdalena, geb. Hölzl, wurde ich am 1. 10. 1920 in Plauen i. Vogtl. geboren.

Ab Ostern 1927 besuchte ich die Volksschule und von 1931 ab das Staatsgymnasium, die spätere Deutschritterschule zu Plauen. Ostern 1940 legte ich an dieser Anstalt die Reifeprüfung ab.

Daran schloß sich meine Arbeitsdienst- und Wehrdienstzeit an. Nach Teilnahme am Rußlandfeldzug wurde ich 1944 nach kurzem Lazarettaufenthalt als 70%-Kriegsversehrter vorzeitig aus dem Wehrdienst entlassen.

Mit dem Wintersemester 1944/45 begann ich das Studium der Medizin an der Universität Jena. Nach Beendigung des ersten Semesters wurde mir die Fortsetzung des Studiums in der sowjetischen Besatzungszone verwehrt. Aufgrund äußerst unzulänglicher Nachkriegsverhältnisse verschlechterte sich mein Gesundheitszustand bis zu hundertprozentiger Arbeitsunfähigkeit.

Im Jahre 1949 flüchtete ich in die Bundesrepublik und heiratete noch im gleichen Jahre.

Da sich mein Allgemeinbefinden in der folgenden Zeit besserte, konnte ich im Wintersemester 1955/56 das Studium der Zahnheilkunde an der Universität in Erlangen aufnehmen. Nach zehn Semestern an der gleichen Hochschule bestand ich 1961 die zahnärztliche Prüfung mit „gut“.

Mit meiner Dissertationsarbeit begann ich im April 1959 an der Medizinischen Universitätsklinik bzw. dem Institut für physikalische und medizinische Strahlenkunde der Universität Erlangen.

